

برآورد تغذیه آب زیرزمینی با استفاده از مدل HYDRUS-1D (مطالعه موردی: هشتگرد)

شمیم لاریجانی^{1*}، حمیده نوری²، حامد ابراهیمیان³

تاریخ دریافت: 1395/10/18 تاریخ پذیرش: 1395/12/7

چکیده

امروزه منابع آب زیرزمینی در تامین آب مورد نیاز کشاورزی نقش بسزایی دارد. با توجه به این که ایران در منطقه‌ای با اقلیم نیمه‌خشک وجود دارد، بررسی جریان برگشتی از آب آبیاری به منابع آب زیرزمینی که جز تلفات آبیاری بحساب نمی‌آید و می‌تواند در تغذیه آب زیرزمینی نقش بسزایی داشته باشد، اهمیت یافته است. هدف از این مطالعه شبیه‌سازی اثر آبیاری بر تغذیه آب زیرزمینی با استفاده از مدل HYDRUS-1D بود. در این راستا از اطلاعات کشت گیاه گندم پاییزه و ذرت در دشت هشتگرد استان البرز طی سال‌های 2004-2013 استفاده (92-1383) شد. نفوذ عمقی آب آبیاری و رطوبت خاک با در نظر گرفتن دو بازده آبیاری 60 و 80 درصد (به ترتیب معادل 40 و 20 درصد نفوذ عمقی) در مدل شبیه‌سازی شده است. نتایج نشان داد که پیش‌روی رطوبت در خاک برای هر دو بازده آبیاری در مزرعه انتخابی باعث بالا آمدن سطح ایستابی، تا عمق 1 متری شد. همچنین بیش‌ترین تغذیه در مزرعه مورد مطالعه مربوط به کشت گندم پاییزه بود. طی سال‌های شبیه‌سازی بازده آبیاری 60 و 80 درصد موجب 2/63 متر و 1/6 متر تغذیه سفره آب زیرزمینی شد که به ترتیب 14/6 درصد و 10/92 درصد از آب آبیاری و بارندگی را شامل می‌شود. نتایج این پژوهش نشان داد که نفوذ عمقی حاصل از آب آبیاری و بارندگی موجب تغذیه و در نتیجه بالا آمدن سطح سفره آب زیرزمینی می‌شود.

واژه‌های کلیدی: بازده، تغذیه آب زیرزمینی، تلفات آبیاری، رطوبت خاک، HYDRUS-1D.

مقدمه

برآورد دقیق از تغذیه آب زیرزمینی به منظور مدیریت موثر آب زیرزمینی امری ضروری به شمار می‌رود. تاکنون تحقیقات زیادی در زمینه برآورد تغذیه آب زیرزمینی انجام شد: (احمدی و همکاران، 1391، نادریان‌فر و همکاران، 1389، Kendy et al., 2004، Xu et al., 2010، Yang et al., 2015). بسیاری از پارامترها مانند خصوصیات خاک، توپوگرافی، مقدار بارش، تبخیر - تعرق و عمق سطح ایستابی بر میزان آب نفوذ یافته به صورت تراوش عمقی که منجر به تغذیه خواهد شد، موثرند و به دلیل وابسته بودن این پارامترها به عوامل مختلف نامعلوم در تخمین آن، روش‌های مختلف تغذیه معمولاً به نتایج متفاوتی منجر می‌شود (گردفرامرزی، 1389). زیو و همکاران در تحقیقی در چین نشان دادند که نشت آب از کانال و نفوذ عمقی آب آبیاری به ترتیب 48 درصد و 44 درصد از تغذیه سالانه آب‌های زیرزمینی را تشکیل می‌دهند (Xu et al., 2010). یو و همکاران در سال 2016 در تحقیقی نشان دادند که نفوذ ناشی از آبیاری (92 درصد از تغذیه کل آب‌های زیرزمینی) و تبخیر آب‌های زیرزمینی (92 درصد از تخلیه کل آب‌های زیرزمینی) عوامل اصلی کنترل نوسانات سطح آب زیرزمینی در فواصل آبیاری بودند (Yue et al., 2010). اگرچه روش‌های مختلفی به صورت تجربی میزان تغذیه آب زیرزمینی را محاسبه می‌کنند، ولی هیچ‌کدام از آن‌ها کارایی و

منابع آب‌های زیرزمینی یکی از مهم‌ترین و ارزان‌ترین منابع آب به‌شمار می‌روند (ایزدی و همکاران، 1392). حدوداً 2 میلیارد نفر به آب‌های زیرزمینی، به عنوان یک منبع اولیه برای آشامیدن و زراعت آبی وابسته هستند (Alley et al., 2002). با این حال در بسیاری از مناطق جهان منابع آب زیرزمینی به علت تعدادی از عوامل از جمله شوری، آلودگی و تخلیه سریع تحت تنش هستند (Wada et al., 2010). استفاده از آب‌های زیرزمینی برای گسترش مناطق شهری، صنعتی و کشاورزی به‌خصوص در مناطق خشک و نیمه‌خشک اهمیت زیادی دارد (Khazaei et al., 2003، Xu and Beekman., 2003، Lee et al., 2005، De Vries and Simmers., 2002). بنابراین

1- دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران
2- استادیار، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران
3- استادیار، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران
* - نویسنده مسئول: (Email: shamim_larijani@ut.ac.ir)

سطح آب، شرط مرزی پایین دست زهکشی عمیق در نظر گرفته شد. نتایج بدست آمده از مدل HYDRUS با مقادیر مشاهداتی سطح آب زیرزمینی نزدیک بود (Neto et al., 2015). در دهه‌های اخیر، متوازن نبودن میزان آب برداشتی از آبخوان با میزان تغذیه آن، سبب افت کمی و کیفی آب این منبع در اکثر دشت‌های کشور شده است (مهدوی و همکاران، 1392). بنابراین ضرورت دارد با مدیریت صحیح، در حفظ و نگهداری این منبع پر ارزش کوشید. بنابراین اهداف انجام این تحقیق بررسی اثر آبیاری بر تغذیه آب زیرزمینی با استفاده از مدل HYDRUS-1D و تعیین مقدار نفوذ عمقی، مدت زمان رسیدن آن به آب زیرزمینی و تغذیه آب زیرزمینی می‌باشد.

مواد و روش‌ها

ویژگی‌های منطقه مورد مطالعه

دشت هشنگرد و حوضه آبریز آن با مساحت 1282 کیلومتر مربع در رشته کوه البرز مرکزی در شمال ایران و در قسمت غربی البرز مرکزی در طول جغرافیائی 22 و 50 تا 7 و 51 و عرض جغرافیائی 48 و 35 تا 7 و 36 واقع شده است. محدوده مطالعاتی در انتهای شمال غربی حوضه آبریز ایران مرکزی قرار گرفته و دارای چند رودخانه است که پر آب‌ترین آن‌ها کردان است. در شکل 1 موقعیت حوضه هشنگرد نشان داده شده است. منطقه مورد مطالعه، مزرعه انتخابی واقع در روستای داران از توابع شهرستان ساوجبلاغ است. این منطقه دارای اقلیم نیمه‌خشک با زمستان نسبتاً سرد و تابستان نسبتاً معتدل می‌باشد. طبق آمار، متوسط بارندگی سالانه در حدود 373 میلی‌متر در سال است. گرم‌ترین ماه سال تیرماه با متوسط دمای (حداکثر) 7/5- درجه سانتی‌گراد و سردترین ماه، دیماه با متوسط دمای (حداقل) 10- درجه سانتی‌گراد است. این پژوهش به‌منظور شبیه‌سازی اثر آبیاری و بارندگی بر آب زیرزمینی برای کشت گندم پاییزه و ذرت در طول سال‌های 2004-2013 (92-1383) با استفاده از مدل HYDRUS-1D انجام شد. در این تحقیق منبع تامین آب چاه است. بافت خاک مزرعه در اعماق مختلف مطابق با جدول 1 است. تاریخ کاشت و برداشت برای گندم پاییزه به ترتیب 13 اکتبر (25 مهر) و 9 ژوئن (19 خرداد) و برای ذرت 22 ژوئن (1 تیر) و 19 سپتامبر (28 شهریور) بود و همچنین دور آبیاری برای هردو گیاه 7 روز محاسبه شد.

شرح مدل

مدل HYDRUS-1D یکی از مدل‌های پیشرفته در ارتباط با حرکت یک‌بعدی آب، املاح و گرما در خاک می‌باشد (Simunek et al., 1998). این مدل شامل حل عددی معادله ریچاردز (معادله 1) برای بررسی حرکت آب در خاک و معادله انتقال - انتشار برای بررسی حرکت گرما و آب در خاک است.

دقت لازم را ندارند (Baalousha., 2010). از میان مدل‌های فیزیکی مدل ریچاردز یکی از مدل‌هایی است که بیش‌ترین عمومیت استفاده را در مدل‌های نفوذ دارا است (متولی زاده، 1391). یکی از مدل‌های نرم افزاری که اخیراً در نقاط مختلف جهان به‌طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته است، مدل HYDRUS-1D است. مدل HYDRUS-1D یکی از مدل‌های پیشرفته در ارتباط با حرکت یک‌بعدی آب، املاح و گرما در خاک است. این مدل توسط سیمونیک و همکاران در آزمایشگاه شوری خاک آمریکا بسط داده شده است. این مدل با استفاده از پارامترهای ساده و در دسترس تخمین صحیح‌تری از نفوذ عمقی حاصل از بارندگی و آب بازگشتی کشاورزی در اختیار قرار می‌دهد و از آن برای محاسبه نفوذ در کشورهای مختلف استفاده شده است و نتایج خوبی از آن به دست آمده است (Simunek et al., 1998). لو و منگوی با استفاده از HYDRUS-1D به تخمین تغذیه آب زیرزمینی در دشت هبی چین پرداختند. به منظور تخمین بهتر از تغذیه در دشت 5 سایت نماینده را برای بررسی اثرات آبیاری و عمق سطح ایستابی در تغذیه آب زیرزمینی انتخاب کردند. در هر سایت HYDRUS-1D با استفاده از داده‌های آب و هوا، رطوبت و عمق آب زیرزمینی اجرا شد. نتایج نشان داد که به‌طور متوسط تغذیه در دشت کوهپایه‌ای به سمت غرب 175 میلی‌متر در سال و در هر دو دشت مرکزی و آبرفتی و دشت ساحلی به سمت شرق 133 میلی‌متر در سال بود. همچنین نتایج نشان داد که زمان اوج نفوذ (بارندگی + آبیاری) و تغذیه در دشت کوهپایه‌ای به سمت غرب 18 تا 35 روز و در دشت مرکزی و آبرفتی 3 تا 5 روز و در دشت ساحلی به سمت شرق 1 تا 2 روز بوده است، که دلیل این تفاوت عمق سطح ایستابی مختلف است (Lu and Menggui., 2009). ما و همکاران در مدل‌سازی نفوذ آب در ستون بزرگی از خاک لایه‌ای مراحل نفوذ را با استفاده از سه مدل محاسبه‌ای، گرین آمپت سنتی، گرین آمپت¹ اصلاح شده و HYDRUS-1D که بر اساس معادله ریچاردز می‌باشد، انجام دادند. این کار در ستونی از خاک به ارتفاع 300 سانتی‌متر و قطر 5/7 سانتی‌متر با 5 لایه خاک با بافت مختلف انجام شد. در مقایسه اعداد به دست آمده از این روش‌ها با مقدار اندازه‌گیری شده، مشاهده شد که مدل گرین آمپت سنتی به اندازه کافی قادر به توصیف مراحل نفوذ نمی‌باشد. شدت نفوذ و نفوذ تجمعی که به وسیله مدل HYDRUS-1D شبیه‌سازی شده‌اند توافق خوبی با نتایج مشاهده شده داشتند (Ma et al., 2010). نتو و همکاران سطح آب زیرزمینی در آبخوان ریوکلارو را مورد بررسی قرار دادند. برای این کار از چاه‌های مشاهده‌ای واقع در دانشگاه ساوث‌پائولو برزیل استفاده شد. به‌منظور محاسبه میزان تغذیه و نوسانات فصلی سطح آب زیرزمینی، روش حل معادله ریچاردز بکار گرفته شد. برای تعیین نوسانات فصلی

برای حرکت افقی $\alpha = 90^\circ$ و برای سایر مسیرها $(0 < \alpha < 90)$ است، S جمله تخلیه (برداشت آب توسط ریشه $[T^{-1}]$ و X فاصله $[L]$ است.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[K(\theta) \left[\frac{\partial h}{\partial x} + \cos \alpha \right] \right] - S \quad (1)$$

که در آن θ رطوبت حجمی $[L^3 L^{-3}]$ ، t زمان $[T]$ ، $K(\theta)$ هدایت آبی غیراشباع $[L T^{-2}]$ ، h مکش ماتریک $[L]$ ، α زاویه بین مسیر جریان و محور عمودی (برای حرکت عمودی در خاک $\alpha = 0$ ،



شکل 1- موقعیت دشت هشنگرد

جدول 1- مشخصات خاک در اعماق مختلف مزرعه آران

نقطه پژمردگی ($\frac{cm^3}{cm^3}$)	ظرفیت زراعی ($\frac{cm^3}{cm^3}$)	چگالی ظاهری (Mg/m^3)	عمق (متر)	بافت خاک
0/14	0/31	1/4	0-4	لومی
0/21	0/44	1/2	4-6	رسی
0/14	0/31	1/4	6-10	لومی
0/21	0/44	1/2	10-14	رسی
0/14	0/31	1/4	14-18	لومی
0/12	0/29	1/35	18-20	لومرسی شنی

در صورتی که $h < h_4$ باشد (بار فشار، نقطه پژمردگی باشد) فرض می‌شود که جذب آب نیز صفر است. بین فشار h_2 و h_3 جذب آب بهینه تصور می‌شود. در حالی که در بار فشار بین h_3 و h_4 یا h_1 و h_2 جذب آب به صورت خطی همراه با h کاهش یا افزایش می‌یابد. جدول 2 مقادیر این اجزا را برای گیاه گندم نشان می‌دهد.

جدول 2 - ضرایب کاهش جذب آب ریشه (سانتی‌متر) (بانک اطلاعاتی Hydrus-1D)

h_1	h_2	h_{3high}	h_{3low}	h_4	محصول
0	-1	-500	-900	-16000	گندم
-15	-30	-325	-600	-8000	ذرت

برداشت آب توسط ریشه (ترم s در معادله 1) براساس حجم آب برداشت شده توسط گیاه در واحد حجم خاک در واحد زمان تعیین می‌شود. در این مدل بر اساس رابطه فدس و همکاران به صورت رابطه 2 تعریف شده است (Feddes et al., 1978):

$$s(h) = \alpha(h) S_p \quad (2)$$

که در آن $\alpha(h)$ تابع کاهشی واکنش به تنش خشکی بدون بعد و $0 \leq \alpha \leq 1$ است و S_p عبارت است از شدت پتانسیل جذب آب زمانی- که $\alpha(h) = 1$ و گیاه فاقد تنش آبی $[T^{-1}]$ است.

$$\alpha(h) \begin{cases} \frac{h-h_4}{h_3-h_4} & h_4 < h \leq h_3 \\ 1 & h_3 < h \leq h_2 \\ \frac{h-h_1}{h_2-h_1} & h_1 < h \leq h_2 \end{cases} \quad (3)$$

که در آن θ_s اشباع نسبی، θ_r رطوبت حجمی اشباع $[L^3 L^{-3}]$ ، θ_r رطوبت باقی مانده $[L^3 L^{-3}]$ ، α ، n و m پارامترهای شکل هستند و α دارای بعد (L^{-1}) است.

جهت برآورد ویژگی‌های هیدرولیکی مدل ون گنوختن انتخاب شده برای مدل HYDRUS از نرم‌افزار RETC (Van Genuchten et al., 1991) استفاده شد. به طوری که مشخصات خاک مانند بافت خاک، وزن مخصوص ظاهری به عنوان ورودی به مدل داده شد و پارامترهای معادله ون گنوختن شامل رطوبت باقی مانده (θ_r)، درصد رطوبت اشباع (θ_s)، هدایت هیدرولیکی اشباع K_s و پارامترهای n و α به عنوان خروجی بدست آمد (جدول 3).

مدل برای توصیف ویژگی‌های هیدرولیکی نظیر منحنی رطوبتی و هدایت آبی غیراشباع که توابع کاملاً غیرخطی با فشار هستند از مدل تحلیلی متفاوت شامل (Van Genuchten., 1980)، (Brooks and Corey., 1964)، (Vogel and Cislserova., 1988)، (Durner., 1994) و (Kosugi., 1996) استفاده می‌کند. معمول ترین رابطه مورد استفاده رابطه ون گنوختن-معلم است که به شرح رابطه 4 تا 6 می‌باشد:

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + (\alpha|h|)^n)^m} \quad (4)$$

$$K(h) = K_s S_e \left(1 - \left(1 - S_e^{\frac{1}{m}}\right)^m\right)^2 \quad (5)$$

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}, \quad m = 1 - \frac{1}{n}, \quad n \geq 1 \quad (6)$$

جدول 3- پارامترهای هیدرولیکی برای بافت‌های مختلف خاک

$K_s \left(\frac{cm}{dy}\right)$	n(-)	α (1/cm)	$\theta_s \left(\frac{cm^3}{cm^3}\right)$	$\theta_r \left(\frac{cm^3}{cm^3}\right)$	بافت خاک
9/02	1/4193	0/015	0/4054	0/0669	لومی
14/32	1/1427	0/0294	0/4351	0/0934	رسی
9/02	1/4193	0/015	0/4054	0/0669	لومی
14/32	1/1427	0/0294	0/4351	0/0934	رسی
9/02	1/4193	0/015	0/4054	0/0669	لومی
31/44	1/48	0/054	0/39	0/1	لومرسی‌شنی

رطوبت(مقدار آن برای هر دو گیاه ذرت و گندم 0/55 است) و θ مقدار رطوبت اولیه (درصد) است.

تبخیر و تعرق مرجع

از روش فائو پنمن مانیتث برای بدست آوردن تبخیر و تعرق مرجع استفاده شد. کمسیون بین‌المللی آبیاری و زهکشی و سازمان خوار و بار جهانی (FAO) روش پنمن - مانیتث را به‌عنوان یک روش استاندارد برای محاسبه تبخیرتعرق پتانسیل و همچنین برای ارزیابی سایر روش‌های برآورد تبخیرتعرق پیشنهاد نموده است (Allen., 1991). در این روش فرض می‌شود که کل سطح پوشش گیاهی یک برگ بزرگ با روزنه‌های موجود در آن است، به همین دلیل این روش پنمن - مانیتث را روش برگ بزرگ (Big Leaf) می‌گویند. و فرمول آن به صورت رابطه 8 می‌باشد:

$$ET_c = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma [890(T + 273)] U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 U_2)} \quad (8)$$

که در آن ET_c تبخیر و تعرق مرجع (میلی‌متر بر روز)، R_n تابش خالص در سطح زمین (مگا ژول بر مترمربع بر روز)، T متوسط دمای هوا در ارتفاع دو متری از سطح زمین (درجه سلسیوس)، U_2 متوسط سرعت باد در ارتفاع دو متری (متر بر ثانیه)، $e_s - e_a$ کمبود فشار بخار در ارتفاع دو متری (کیلوپاسکال)، Δ شیب منحنی فشار بخار

شرایط مرزی بالادست (سطح خاک) اتمسفریک با رواناب (Atmospheric BC with surface Run Off) در نظر گرفته شد، این شرایط اتمسفری زمانی در نظر گرفته می‌شود که سطح خاک در تماس با اتمسفر باشد و تبخیر و تعرق صورت پذیرد. برای شرایط مرزی پایی دست جریان ثابت (Constant Flux) انتخاب شد در این پژوهش با توجه به اطلاعات موجود اولیه مدل را برای اولین فصل رشد (ذرت 2004) شبیه‌سازی شد و رطوبت شبیه‌سازی بدست آمده توسط مدل، به عنوان رطوبت اولیه برای شبیه‌سازی دوره بعدی در نظر گرفته شد و به همین ترتیب این کار را برای دیگر فصل‌ها به ترتیب تکرار شد. بدین منظور برای خاک مورد مطالعه رطوبت خاک در سطح آب زیرزمینی برابر رطوبت اشباع در نظر گرفته و رطوبت زیر منطقه ریشه با فرض میانگین رطوبت برابر ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی انجام شد. با توجه به این‌که در کشت‌های مورد نظر، بارندگی قبل از کشت وجود نداشت فرض گردید رطوبت اولیه خاک منطقه ریشه برابر با رطوبت در شرایط بحرانی (رطوبت خاک قبل از آبیاری) می‌باشد. برای این منظور از معادله 7 برای محاسبه رطوبت اولیه استفاده شد.

$$MAD(F_c - FWP) = F_c - e \quad (7)$$

که در آن F_c مقدار رطوبت در حد ظرفیت زراعی (درصد)، FWP مقدار رطوبت در حد پژمردگی (درصد)، MAD حداکثر تخلیه مجاز

جدول 5- مقادیر ضریب گیاهی پایه (K_{gp}) ارایه شده برای گیاه

گندم پاییزه و ذرت			
گیاه	اولیه	میانی	انتهاپی
گندم پاییزه	0/15	1/1	0/15
ذرت	0/15	1/1	1

عمق آب آبیاری

برای بدست آوردن عمق آب آبیاری با استفاده از داده‌های بارندگی که از ایستگاه هواشناسی بدست آمد بارش موثر محاسبه شد. برای محاسبه بارش موثر از روش وزارت کشاورزی ایالات متحده (USDA) استفاده شد. وزارت کشاورزی ایالات متحده فرمولی مطابق رابطه 13 به منظور تعیین میزان بارندگی موثر ماهانه ارایه نمود. در این روش در صورتی که مقدار بارندگی ماهانه کمتر از 70 میلی متر باشد:

$$PE = \frac{P_{\text{ماه}} (125 - 0.2 \times P_{\text{ماه}})}{125} \quad (13)$$

و در صورتی که مقدار بارندگی ماهانه بیش از 70 میلی متر باشد از رابطه 14 استفاده می‌شود:

$$PE = (125 + 0.1 \times P_{\text{ماه}}) \quad (14)$$

برای بدست آوردن عمق آبیاری با توجه به این که دور آبیاری 7 در نظر گرفته شد، مجموع بارش موثر در یک هفته با مجموع تبخیر - تعرق پتانسیل یک هفته مورد مقایسه قرار گرفت. در صورتی که بارش موثر کمتر از تبخیر - تعرق پتانسیل باشد نیاز به آبیاری وجود خواهد داشت که به صورت رابطه 15 محاسبه شد:

$$\text{عمق ناخالص آبیاری} = \frac{ET - P}{\text{راندمان}} \quad (15)$$

که در آن P مجموع بارندگی موثر در یک هفته و ET مجموع تبخیر - تعرق پتانسیل در یک هفته است.

پس از وارد کردن داده‌های مورد نیاز مدل، شبیه‌سازی نفوذ عمقی در اعماق مختلف توسط مدل HYDRUS-1D انجام شد. خروجی - های مورد استفاده از این مدل مقدار رطوبت در اعماق 0 تا 20 متری و همچنین نفوذ عمقی می‌باشد. شبیه‌سازی برای دو راندمان 60 و 80 درصد انجام شد.

میزان تغذیه در هر فصل کشت با توجه به قرار گرفتن سطح ایستابی در لایه خاک مورد نظر با فرمول 16 محاسبه شد:

$$d = (\theta_c - \theta_r) * (\text{تغذیه(متر)}) \quad (16)$$

که در آن d اختلاف عمق سطح ایستابی بین فصل کشت مورد نظر و فصل کشت قبل (متر)، θ_c رطوبت اشباع در لایه مورد نظر $(\frac{cm^3}{cm^3})$ ، θ_r رطوبت اولیه داده شده به مدل در لایه مورد نظر $(\frac{cm^3}{cm^3})$ است. همچنین میزان تخلیه در هر فصل کشت از فرمول 17 محاسبه شد:

کیلوپاسکال بر درجه سلسیوس)، γ ضریب ثابت سایکرومتری (کیلوپاسکال بر درجه سلسیوس) G، شار گرما به داخل خاک (مگا ژول بر مترمربع بر روز) است. برای آن که بتوان نتایج حاصل از محاسبه ET_p را برای پوشش گیاهی منطقه مورد نظر به کار برد لازم است مقادیر بدست آمده ET_p را در ضریب گیاهی ضرب کرده تا تبخیر و تعرق پتانسیل بدست آید.

$$ET_p = K_g \times ET_p \quad (9)$$

که در آن ET_p تبخیر و تعرق پتانسیل و K_g ضریب گیاهی است. مقدار K_g ارایه شده توسط فائو برای گیاه گندم پاییزه و ذرت در جدول 4 آمده است.

جدول 4 - مقادیر ضریب گیاهی K_g ارایه شده در مراحل مختلف رشد

محصولات گندم پاییزه و ذرت			
گیاه	اولیه	میانی	انتهاپی
گندم پاییزه	0/4	1/15	0/25
ذرت	0/3	1/15	1/05

طبق دستور پیشنهادی در نشریه فائو اگر آبیاری از نوع بارانی و یا سطحی باشد (عمق آب آبیاری نفوذ یافته 40 میلی متر یا بیش تر) می‌توان برای K_{gmid} از مقدار ارایه شده در جدول 3 استفاده کرد. اما لازم است مقدار K_{gmid} و K_{gend} تصحیح شود. بنابراین برای تصحیح K_{gmid} و K_{gend} طبق دستور فائو از رابطه 10 استفاده شد:

$$K_{gmid} = K_{gmid(standard)} + [0.04(U_2 - 2) - 0.004(RH_{min} - 45)] \left[\frac{h}{3} \right]^{0.3} \quad (10)$$

که در آن RH_{min} حداقل رطوبت نسبی در منطقه، U_2 سرعت باد در ارتفاع دو متری و h ارتفاع گیاه است.

برای انجام مدل سازی لازم است مقدار تبخیر و تعرق از هم مجزا شود به همین منظور از معادله ارایه شده در رابطه 11 استفاده شد:

$$ET_p = (K_{g2} + K_{g1}) * ET_p \quad (11)$$

ضریب گیاهی در روش دو جزئی، به دو ضریب جداگانه که یکی اثر تعرق گیاه را توصیف کرده و ضریب گیاهی پایه (K_{gp}) نامیده شده و دیگری اثر تبخیر از خاک (K_g) را بیان می‌کند، تفکیک شده است. طبق دستور پیشنهادی در نشریه فائو، در اقلیم‌هایی با حداقل رطوبت نسبی متفاوت از 45 درصد یا سرعت باد متفاوت از دو متر بر ثانیه مقادیر K_{gmid} و K_{gend} بزرگ تر یا مساوی 45/ باید با استفاده از معادله 12 اصلاح شود:

$$K_{g2} = K_{g2(standard)} + [0.04(U_2 - 2) - 0.004(RH_{min} - 45)] \left[\frac{h}{3} \right]^{0.2} \quad (12)$$

که در آن RH_{min} حداقل رطوبت نسبی در منطقه، U_2 سرعت باد در ارتفاع دو متری و h ارتفاع گیاه است. مقدار K_{g2} ارایه شده توسط فائو برای گیاه گندم پاییزه و ذرت در جدول 5 آمده است

در شکل 4 صعود عمق آب زیرزمینی با لحاظ کردن دو راندمان آبیاری 60 و 80 درصد برای مزرعه مورد مطالعه نشان داده شده است. برای بدست آوردن صعود عمق آب زیرزمینی در طول فصل کشت ذرت علوفه‌ای و گندم پاییزه اولین نقطه‌ای که رطوبت به درجه اشباع رسیده است، به عنوان افزایش سطح عمق آب زیرزمینی همان سال در نظر گرفته شد و تغییرات عمق آب زیرزمینی با توجه به راندمان-های 60 و 80 درصد رسم گردید. مدت زمان انتقال نفوذ عمقی برای دو راندمان آبیاری متفاوت بوده است. نتایج نشان داد، عمق آب زیرزمینی در آبیاری با راندمان 60 درصد از سال 2007 (فصل کشت ذرت علوفه‌ای) افزایش یافته در صورتی که در آبیاری با راندمان 80 درصد تغییرات عمق آب زیرزمینی تقریباً با یک سال تاخیر نسبت به راندمان 60 درصد از سال 2009 (فصل کشت گندم پاییزه) شروع شده است.

شکل 5 میزان تغذیه ناشی از آبیاری و بارندگی را نشان می‌دهد. در این شکل تبخیر و تعرق پتانسیل گیاه، تغذیه و آبیاری و بارندگی در هر فصل کشت نمایش داده شده است. نمودارهای تغذیه در مزرعه را نشان می‌دهند که تغذیه در راندمان 60 درصد از فصل کشت گندم 2007 (1385) شروع و برای راندمان 80 درصد از فصل کشت ذرت 2009 (1387) شروع شده است. نمودار تغذیه پس از شروع از فصل کشتی به بعد به صفر می‌رسد دلیل این موضوع این است که عمق آب زیرزمینی در این فصل‌ها تا منطقه ریشه به درجه اشباع می‌رسد و میزان تغذیه به صفر می‌رسد، اما در محاسبه میزان تغذیه کلی طی این سال‌ها، میزان تلفات (نفوذ عمقی) برابر با تغذیه در نظر گرفته شده است. نتایج نشان داد که به دلیل قرار گرفتن قسمت عمده کشت گندم در پاییز و زمستان و بارندگی زیاد در این فصل‌ها، آب برگشتی ناشی از کشت گندم بیش‌تر از ذرت بوده است. کم‌ترین مقدار تغذیه برای راندمان 80 درصد برابر با 0/00288 متر در هر فصل کشت و بیش‌ترین مقدار آن برابر با 0/3758 متر در هر فصل کشت است. همچنین برای راندمان 60 درصد کم‌ترین میزان تغذیه برابر با 0/18425 متر در هر فصل کشت و بیش‌ترین مقدار آن برابر با 0/43347 متر در هر فصل کشت بدست آمده است. طبق نتایج بدست آمده می‌توان گفت تقویم زراعی، نوع محصول و نیاز آبی آن نیز در میزان تغذیه آبخوان تأثیر دارد. در تحقیقی مشابه جیمز مارتیز و همکاران به منظور محاسبه آب برگشتی ناشی از آبیاری دو محصول کاهو و خربزه در کامپوکارداجنا در جنوب شرقی اسپانیا، از مدل ID-HYDRUS- استفاده کردند. نتایج نشان داد که 22 تا 68 درصد از آب آبیاری صرف تغذیه سفره آب زیرزمینی شد (Jiménez-Martínez et al., 2009).

$$(17) \quad d = \frac{z}{\left(\frac{C_{p1}}{C_{p2}} - \frac{C_{p1}}{C_{p3}}\right)}$$

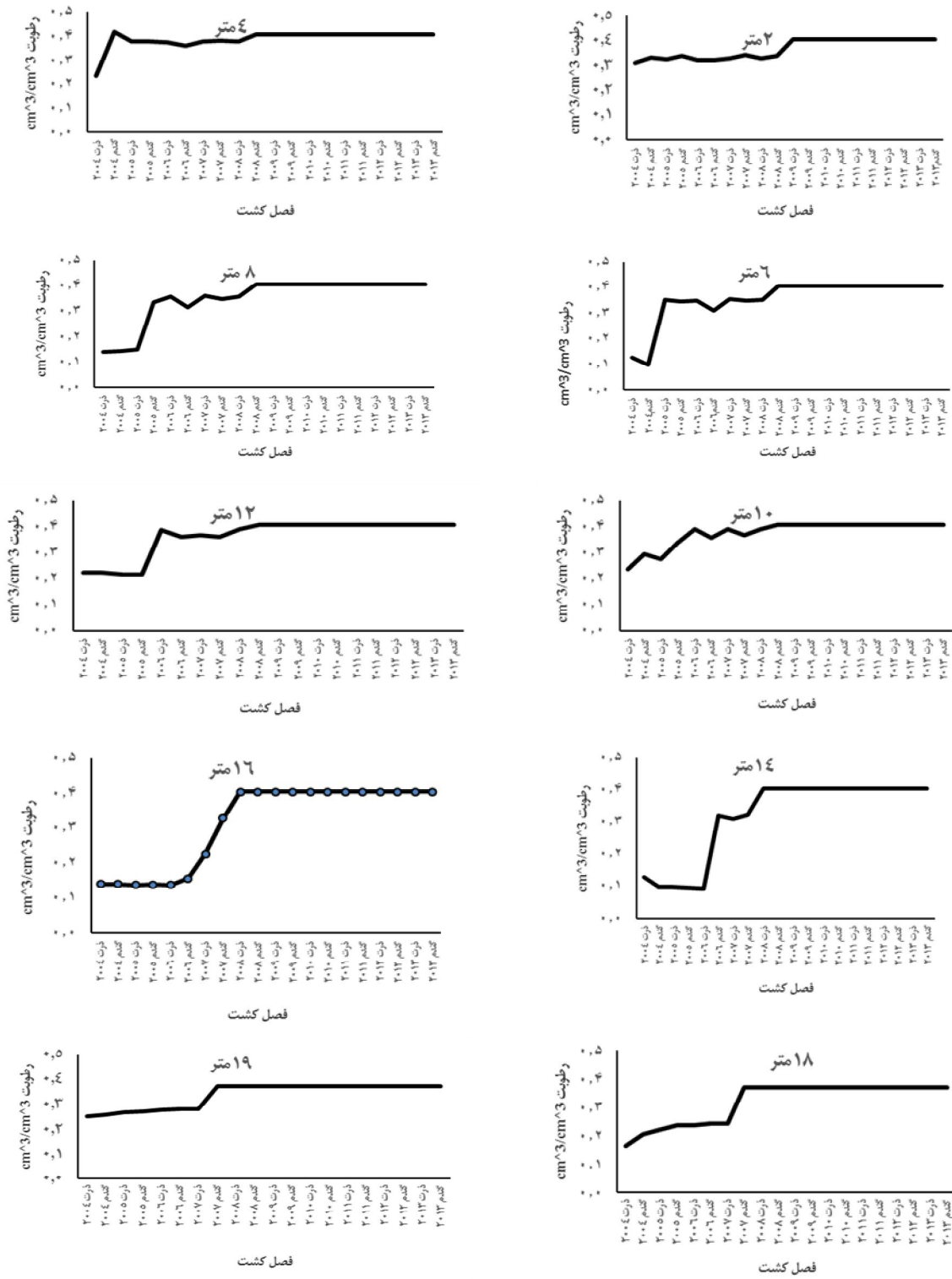
تخلیه (متر)

که در آن d اختلاف عمق آب آبیاری در فصل کشت مورد نظر (متر)، C_{p1} رطوبت اشباع در لایه مورد نظر $\left(\frac{C_{p1}}{C_{p2}}\right)$ ، C_{p2} رطوبت ظرفیت زراعی در لایه مورد نظر $\left(\frac{C_{p1}}{C_{p3}}\right)$ است.

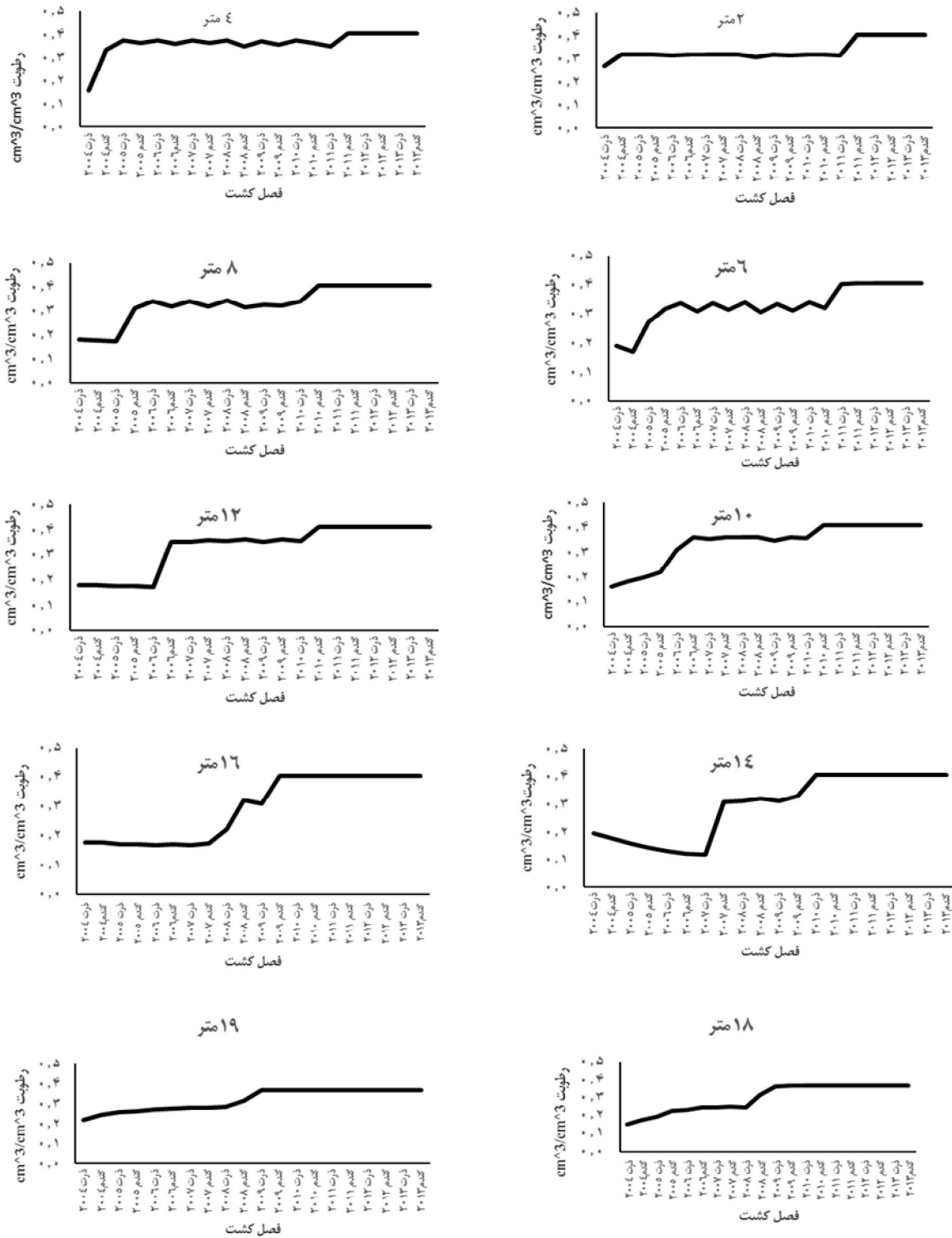
نتایج و بحث

تغییرات رطوبت در عمق‌های مختلف خاک بسته به مقدار نیاز آبی گیاه، نوع خاک و مدیریت آبیاری متفاوت می‌باشد. در مزرعه مورد مطالعه با توجه به این که عمق آبخوان 20 متر بود، در نتیجه تغییرات رطوبت خاک در طول کشت تا عمق 19 متری شبیه‌سازی شد. شکل‌های 2 و 3 مقادیر رطوبت خاک برای ذرت و گندم را در عمق-های مختلف با دو راندمان آبیاری 60 و 80 درصد نشان می‌دهند. در این مزرعه با توجه به این که آبخوان کم‌عمق بوده تأثیر نفوذ عمقی حاصل از آبیاری و بارندگی بیش‌تر بوده است. به طوری که تغییرات رطوبت خاک در سال‌های مختلف افزایش پیدا کرده و به درجه اشباع رسیده است. با بررسی نتایج حاصل از شکل‌ها، تفاوت در پیش‌روی رطوبت در عمق‌های مختلف دیده می‌شود. همچنین نتایج نشان داد که رطوبت در راندمان 60 درصد در عمق 18 متر در فصل کشت ذرت 2007 به درجه اشباع (37 درصد حجمی) و در راندمان 80 درصد با تاخیر در رسیدن آب به آبخوان نسبت به راندمان 60 درصد، در فصل کشت ذرت 2008 به درجه اشباع رسیده است. از دلایل دیگر تفاوت بین پیش‌روی رطوبت در لایه‌های مختلف خاک می‌توان به اختلاف در وضعیت بافت خاک اشاره کرد. همچنین، هر چه رطوبت در یک خاک بیش‌تر و به حد رطوبت اشباع در آن خاک نزدیک‌تر باشد تأثیر نیروی مکش بر روی آب در خلل و فرج خاک کم‌تر شده و آب راحت‌تر در خاک حرکت می‌کند.

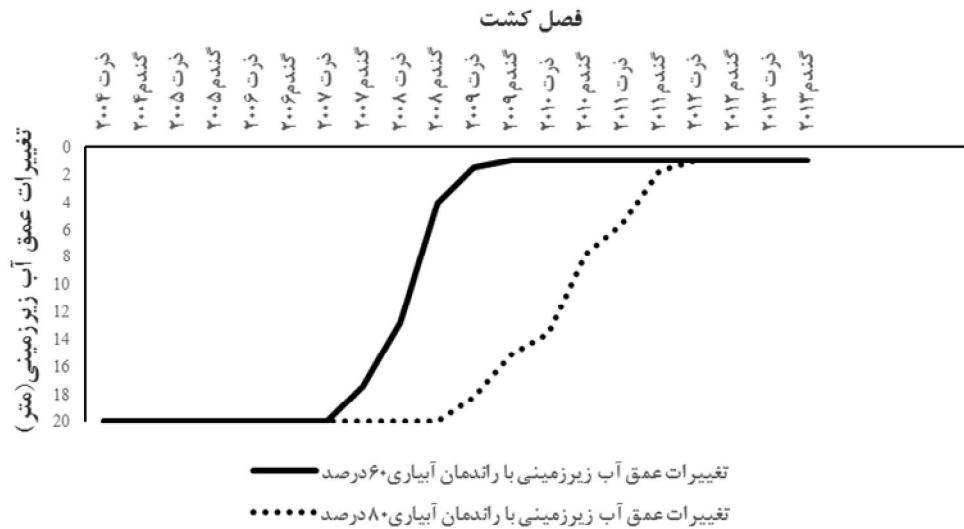
با توجه به این که در آبیاری سطحی با راندمان 60 درصد، عمق زیاد آب یک‌باره به زمین داده شد، بنابراین تلفات نفوذ عمقی افزایش پیدا کرده است اما در آبیاری بارانی به منظور بالا بردن راندمان آبیاری عمق کم‌تر آب به خاک داده شده است و به همین دلیل تلفات نفوذ عمقی نیز کاهش یافته و آب فرصت نفوذ به اعماق پایین‌تر را نداشت. هنی و همکاران روش‌های سنتی آبیاری مانند آبیاری جویچه‌ای را به عنوان یکی از منابع آب برگشتی معرفی کرده که می‌توانند با افزایش رواناب سطحی، نفوذ عمقی و افزایش تراز آب موجب افزایش تراز آب برگشتی شده و در نهایت آبیاری به سیستم رودخانه‌ای بپیوندند (Heaney et al., 2006). دواندل و همکاران جریان برگشتی ناشی از آب آبیاری برای مزارع برنج، سبزیجات و گل‌ها را به ترتیب برابر ۵۰،۲۵ و 12 درصد میزان آبیاری در جنوب هندوستان گزارش نمودند (Dewandel et al., 2007).



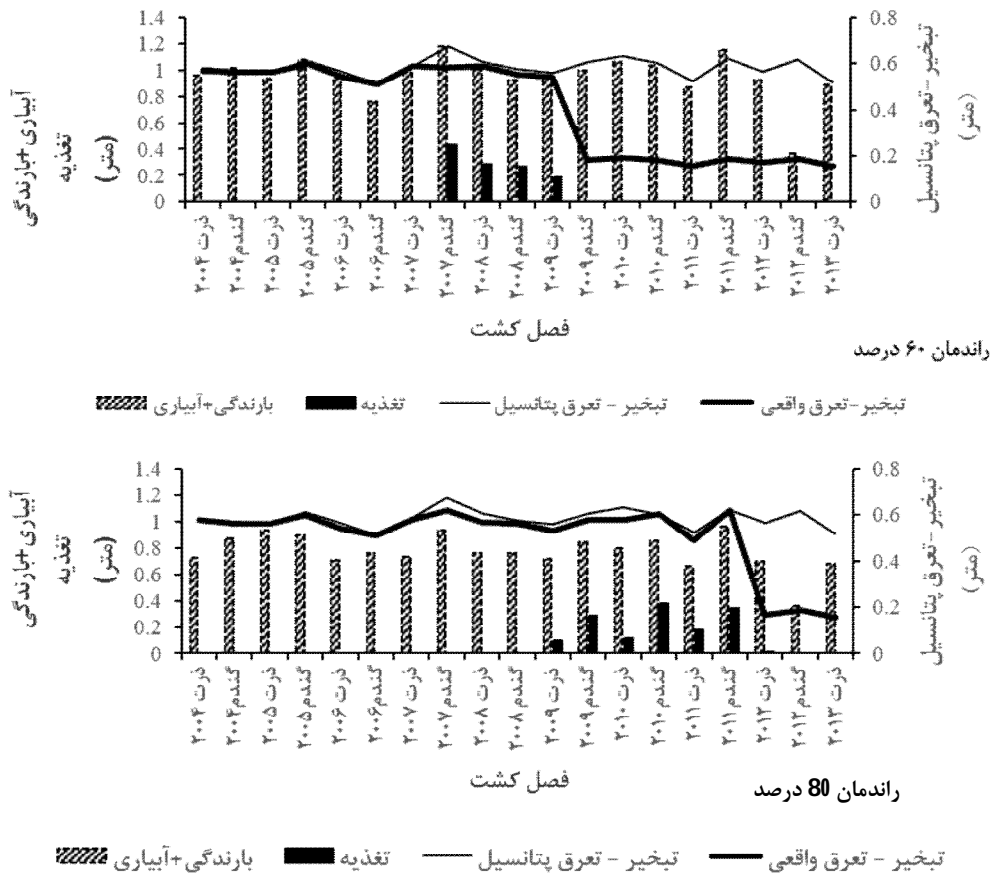
شکل 2- تغییرات فصلی رطوبت خاک در اعماق مختلف با راندمان آبیاری 60 درصد



شکل 3- تغییرات فصلی رطوبت خاک در اعماق مختلف با راندمان آبیاری 80 درصد



شکل 4- صعود عمق آب زیرزمینی با دو راندمان آبیاری 60 و 80 درصد



شکل 5- تغییرات فصلی تغذیه، آبیاری، بارندگی و تبخیر - تعرق پتانسیل

این مزرعه، طی سال‌های شبیه‌سازی راندمان 60 و 80 درصد موجب 2/63 متر و 1/6 متر تغذیه می‌شوند که به ترتیب 14/6 درصد و 10/92 درصد از آب آبیاری و بارندگی را شامل می‌شود.

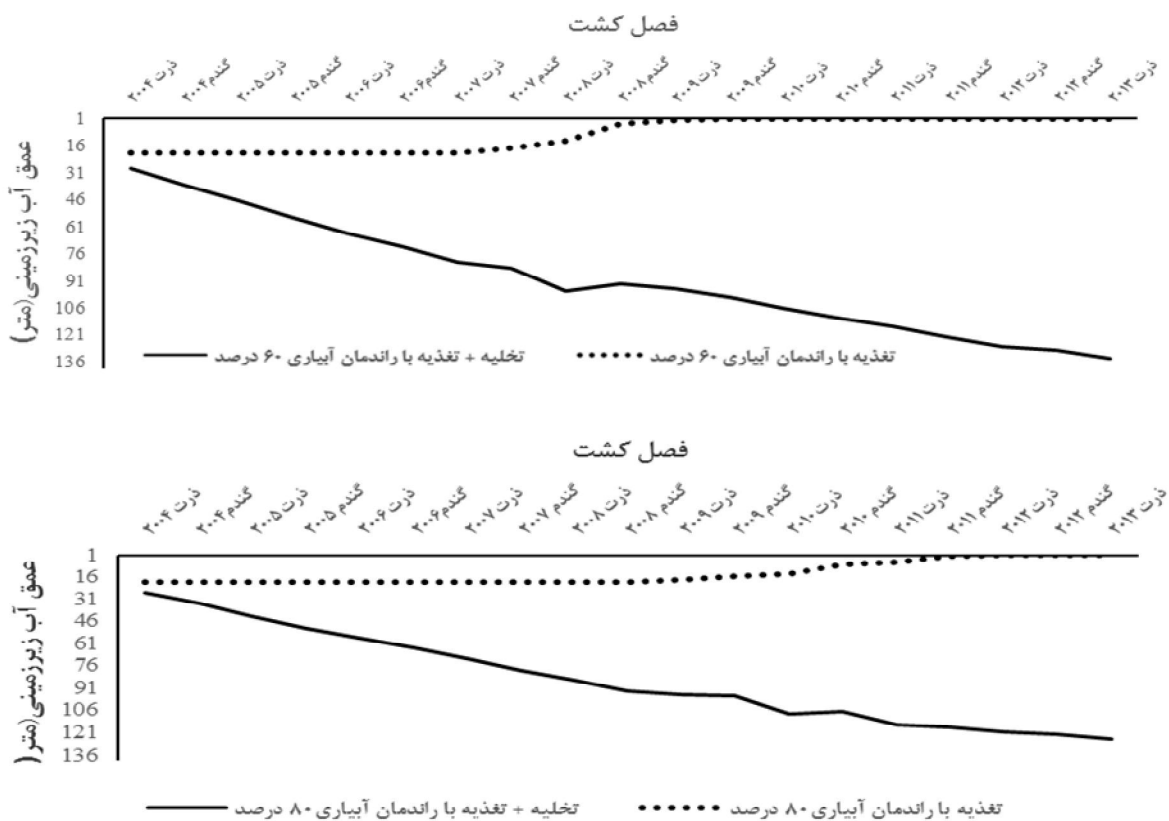
در جدول 6، درصد آب آبیاری که منجر به تغذیه آبخوان شده است مشخص شده است. همان‌طور که مشخص است بیش‌ترین درصد تغذیه مربوط به راندمان 60 درصد می‌باشد. به صورت کلی در

جدول 6- درصد تغذیه از آب آبیاری و بارندگی در دوره زمانی مورد مطالعه

راندمان کاربرد (درصد)	تغذیه تجمعی (متر)	آبیاری و بارندگی (متر)	درصد تغذیه
60	2/63	18/01	14/60
80	1/6	14/65	10/92

شبیه‌سازی 133 متر بوده و سطح آبخوان را تا 134 متری پایین آورده، همچنین در آبیاری با راندمان 80 درصد میزان تخلیه 125 متر بوده که توانست موجب تغییرات سطح آبخوان تا عمق 126 متری شود.

شکل 6 نوسانات عمق آب زیرزمینی در اثر تخلیه (برداشت آب زیرزمینی برای آبیاری) به‌علاوه تغذیه (آبیاری + بارندگی) در هر فصل کشت را طی سال‌های شبیه‌سازی نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است مقادیر تخلیه در مقایسه با تغذیه مقدار قابل توجهی است. در آبیاری با راندمان 60 درصد تخلیه تجمعی در طول سال‌های



شکل 6- تغییرات عمق آب زیرزمینی بر اثر تغذیه و تخلیه به‌علاوه تغذیه

نتیجه‌گیری

با توجه به این که ایران در منطقه خشک و نیمه‌خشک قرار دارد و عمده منابع آب صرف کشاورزی می‌شود، در این پژوهش سعی شد تا با برآورد میزان تغذیه ناشی از آب برگشتی ناشی از آبیاری، شناخت بیش‌تری نسبت به مقدار آبی که از زمین‌های زراعی به آب‌های زیرزمینی می‌پیوندد حاصل شود. علاوه بر این، با توجه به مکانیزه شدن عملیات آبیاری در سال‌های اخیر، لازم است تا سیستم آبیاری سطحی با آبیاری تحت فشار از حیث مقدار آب برگشتی به آبخوان مقایسه شود. به همین منظور این تحقیق جهت بررسی تاثیر آبیاری و بارندگی در تغذیه آبخوان و پاسخ به این پرسش که آیا آبیاری و بارندگی تاثیری بر تغذیه آب زیرزمینی دارند، صورت گرفت. در این مطالعه مزرعه با کشت گندم پاییزه و ذرت علوفه‌ای واقع در هشتگرد، با دو راندمان کاربرد آبیاری 60 و 80 درصد به منظور بررسی میزان تغذیه آبخوان در اثر آبیاری و بارندگی با استفاده از مدل ID HYDRUS- انتخاب شد. نتایج نشان داد که به دلیل کم بودن عمق آبخوان، آب برگشتی ناشی از بارندگی و آبیاری طی سال‌های شبیه-سازی به سطح آبخوان رسیده و باعث افزایش آن شد. نتایج نشان داد که آبیاری با راندمان‌های 60 و 80 درصد به ترتیب موجب تغذیه به مقدار 2/63 و 1/6 متر طی 10 سال شد. برای راندمان 60 درصد مدت زمانی که طول کشید تا نفوذ عمقی حاصل از آبیاری و بارندگی به سطح آبخوان برسد 3 سال و 125 روز و برای راندمان 80 درصد 5 سال بدست آمد. پیشنهاد می‌شود که برای بدست آوردن نتایجی با درصد اطمینان بالاتر بهتر است از داده‌های اندازه‌گیری شده رطوبت خاک در اعماق مختلف تا سطح آب زیرزمینی برای واسنجی و صحت‌سنجی مدل استفاده شود.

منابع

- ایزدی، ع.ا.، علیزاده، ا.، داوری، ک.، ضیایی، ع.ن. و اخوان، س. 1392. کاربرد ارزیابی یک مدل توسعه یافته آب زیرزمینی - آب سطحی در حوضه آبریز نیشابور. رساله دکتری. دانشگاه فردوسی مشهد.
- سلطانی گردفرامری، س.، عابدی کوپایی، ج. 1382. تخمین تغذیه آب زیرزمینی زیر حوضه کرون در منطقه اصفهان با استفاده از مدل CRD. فصل‌نامه علمی - پژوهشی آب و فاضلاب 4: 92-97.
- متولی‌زاده کاخکی، م.، قهرمان، ب.، داوری، ک. 1391. شبیه‌سازی نفوذ با استفاده از مدل هایدروس (مطالعه موردی دشت جوبین سبزوار)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه فردوسی مشهد.
- مهدوی، م.، فرخ‌زاده، ب.، سلاجقه، ع.، ملکیان، آ.، سوری، م. 1392. شبیه‌سازی آبخوان دشت همدان بهار و بررسی سناریوهای مدیریتی با استفاده از مدل PMWIN. مجله پژوهش آبخیزداری (پژوهش و سازندگی). 98: 108-116.
- نادریان‌فر، م.، انصاری، ح.، ضیایی، ع.، داوری، ک. 1390. بررسی روند تغییرات نوسانات سطح آب زیرزمینی در حوضه آبریز نیشابور تحت شرایط اقلیمی مختلف. فصل‌نامه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب. سال، اول شماره 3. صفحه 37-21.
- Allen, R.G., Howell, T.A., Pruitt, W.O., Walter, I.A. and Jensen, M.E. (eds). 1991. Lysimeters for evapotranspiration and environmental measurements. In: Proc Int.
- Alley, W.M., Healy, R.W., LaBaugh, J.W., Reilly, T.E. 2002. Flow and storage in groundwater systems, Science. 296: 1985-1990.
- Baalousha, H. 2005. Using CRD method for quantification of groundwater recharge in the Gaza strip, Palestine. Environmental Geology. 48: 889-900.
- Brooks, R.H. and Corey, A.T. 1964. Hydraulic properties of porous media. Hydrology Paper No.3, Colorado State Univ.
- De Vries, J.J., Simmers, I. 2002. Groundwater recharge: An overview of processes and challenges. Journal of Hydrogeology. 10:5-17.
- احمدی، ط.، ضیائی، ع.ن.، رسول‌زاده، ع. و داوری، ک. 1391. برآورد تغذیه‌ی آب‌های زیرزمینی دشت نیشابور با روش نوسانات سطح ایستابی (WTF). مجموعه مقالات سومین همایش مدیریت جامع منابع آب. 20 و 21 شهریور، ساری.

- Wuhan Hubei, 430074, China).
- Ma, Y., Feng, S., Su, D., Gao, G. and Huo, Z. 2010. Modeling water infiltration in a large layered soil column with a modified Green-Ampt model and HYDRUS-1D. *Computers and Electronics in Agriculture* 71: 40-47.
- Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO), Printed Mills Litho.
- Neto, D.C., Chang, H.K. and Van Genuchten, M.T. 2015. A Mathematical View of Water Table Fluctuations in a Shallow Aquifer in Brazil. *Groundwater*. 54.1:82-91.
- Simunek, J., Huang, K., Sejna, M. and Van Genuchten, M.T.H. 1998. The HYDRUS-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media—Version 2.0. Igwmc-tps-70, International Ground Water Modeling Center, Colorado School of Mines, Golden, Colorado.
- Van Genuchten, M.T.h., Leij, F.J. and Yates, S.R. 1991. The RETC code for quantifying the hydraulic function of unsaturated soil. Report No. Epa/600/2-91/065.
- Van Genuchten, M.T. 1980. A closed- form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil science society of America journal*. 44.5: 892-898.
- Vogel, T. and Cislerova, M. 1988. On the reliability of unsaturated hydraulic conductivity calculated from the moisture retention curve. *Transport in pore media*. 3:1-15.
- Wada, Y., Beek, C.M., Kempen, J.W.T.M., Reckman, S., Vasak, M.F.P. 2010. Global depletion of groundwater resources, *Geophys. Research Letters*. 37, L20402.
- Xu, X., Huang, G., Qu, Z., Pereira, L. 2010. Assessing the groundwater dynamics and impacts of water saving in the Hetao Irrigation District, Yellow River basin. *Journal of Agricultural Water Management*. 98.2: 301-313.
- Xu, Y. and Beekman, H.E. eds. 2003. *Groundwater recharge estimation in Southern Africa* (p. 206).
- Dewandel, B., Gandolfi, J. M., Condappa, D., Ahmed, S. 2007. An efficient methodology for estimating irrigation return flow coefficients of irrigated crops at watershed and seasonal scale, *Journal of Hydrology*. 22: 1700-1712.
- Durner, W. 1994. Hydraulic conductivity estimation for soil with heterogeneous pore structure. *Water Resources*. 32.9: 211-223.
- Feddes, R.A., Kowalik, P. and Zarandy, H. 1978. Simulation of field water use and crop yield. Wageningen, pp. 189.
- Heaney, A., Dwyer, G., Beare, S., Peterson, D. and Pechey, L. 2006. Third-party effects of water trading and potential policy responses. *Australian Journal of Agricultural and Resource Economics*, 50.3:277-293.
- Jiménez-Martínez, J., Skaggs, T.H., Van Genuchten, M.T. and Candela, L. 2009. A root zone modelling approach to estimating groundwater recharge from irrigated areas. *Journal of Hydrology*. 367.1:138-149.
- Kendy, E., Zhang, Y., Liu, C., Wang, J., Steenhuis, T. 2004. Groundwater recharge from irrigated cropland in the North China Plain: case study of Luancheng County, Hebei Province, 1949–2000, *Hydrology*. 18: 2289–2302.
- Khazaei, E., Spink, A.E.F., Warner, J.W. 2003. A catchment water balance model for estimating groundwater recharge in arid and semiarid regions of south-east Iran. *Journal of Hydrogeology*. 11: 333-342.
- Kosugi, K. 1996. Lognormal distribution model for unsaturated hydraulic properties *Water Resources*. 32.9: 2697-2703.
- Lee, J.Y., Yi, M.J. and Hwang, D. 2005. Dependency of hydrologic responses and recharge estimates on water-level monitoring locations within a small catchment. *Journal of Geosciences*. 9.3: 277-286.
- Lu, X. and Menggui, J. 2009. Estimation groundwater Recharge by 1d unsaturated water modeling, a case of study in Luan city. (School of Environmental Studies, the China University of Geosciences,

Yue,W., Liu,X., Wang,T and Chen,X. 2016. Impacts of water saving on groundwater balance in a large-scale arid irrigation district, Northwest China. Irrigation Science:1-16.

Unesco.

Yang,X., Chen,Y., Pacenka,S., Gao,W., Zhang,M. 2015. Recharge and groundwater Use in the North China Plain for Six Irrigated Crops for an Eleven Year Period. Juornal of Plos One. 10.1: 1-17.

Estimating Groundwater Recharge by HYDRUS-1D Model (Case Study: Hashtgerd)

SH. Larijani^{1*}, H. Noori², H. Ebrahimian³

Received: Jan.07, 2017

Accepted: Feb.25, 2017

Abstract

Today groundwater resources play an important role in the water supply of agriculture. Iran is in the semi-arid region so evaluation of irrigation that turns into groundwater resources that called the return flow could have a major role in groundwater recharge and must be considered for effective management of groundwater resources. The goal of this study was investigating the effect of irrigation on groundwater recharge by using the HYDRUS-1D model. In this case study, the data were obtained from a complete growing season of maize and wheat which were planted in the Hashtgerd Alborz Province during the years of 20004-2013. Soil moisture and deep percolation were simulated for two different irrigation efficiencies of 60 and 80 percent (equivalent to 40 and 20 percent deep percolation of irrigation, respectively). The results showed that soil moisture advance under irrigation efficiency increased the level of ground water to 1 m. Also the highest percentage of groundwater recharge from irrigation and rainfall was for winter wheat. During the simulation, irrigation efficiency of 60% and 80%, recharge 2.63 m and 1.6 m the ground water level that 14.6 and 10.92 percent are included irrigation and rainfall respectively. The results of this study showed that deep percolation of irrigation and rainfall can recharge and rise of the groundwater level.

Key Words: Efficiency, Groundwater recharge, HYDRUS-1D, Irrigation losses, Soil moisture

1- Graduate student of Irrigation and Drainage, Department of Irrigation and Reclamation Eng., College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran

2- Assistant professor, Department of Irrigation and Reclamation Eng., College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran

3- Assistant professor, Department of Irrigation and Reclamation Eng., College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran

(*-Corresponding Author Email: shamim_larijani@ut.ac.ir)